科技创新推动下“智慧土地”发展的机遇与挑战

刘耀林　何建华

1 武汉大学 资源与环境科学学院 武汉 430079
2 数字制图与国土信息应用工程自然资源部重点实验室 武汉 430079
3 地理信息系统教育部重点实验室 武汉 430079

摘要　我国土地资源禀赋和人口经济持续快速增长的压力，导致土地资源高强度、高风险利用等不可持续发展问题，迫切需要土地科技创新，转变土地资源治理模式，提升土地资源治理能力，以及发展以土地资源数字化、精细化、智能化为核心的“智慧土地”。文章探讨了智慧土地的基本概念和内涵，分析了“智慧土地”建设存在的问题与挑战，提出了亟待突破的关键技术，为我国顺利推进“智慧土地”建设提供参考和借鉴。

关键词　智慧土地，土地资源生命体，智能感知，大数据聚合，人地协同

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200415001

我国用全球7%的耕地承载着近20%的人口，保障了快速工业化和城市化发展进程，取得了举世瞩目的成绩，但也导致了我国极其稀缺的土地资源长期面临高强度、高风险利用、极度缺乏弹性空间等一系列可持续发展的问题。过去30多年的发展，支撑我国国土空间开发的土地资源、水资源、能矿资源和生态资源等基础条件发生了巨大变化。今后10—20年仍是我国工业化、城镇化快速推进的重要时期，也是空间结构调整的重要时期。我国既要满足人口增加、人民生活改善、经济发展对国土空间的巨大需求，又要为保障粮食安全而保护耕地，还要保障生态安全和人民健康。这就需要更加注重高效、协调、可持续的土地资源，需要更加注重处理集聚和分散、开发和保护的关系，需要更加注重国土安全，构建高效、协调和可持续的国土空间开发格局[1]。因此，需要精准化、动态监管每一块土地资源开发利用与保护全过程，传统的土地资源管理模式面临着挑战。

同时，我国土地利用活动的多样性与土地问题的特殊性，也迫切需要通过土地科技创新、寻求更先进的技术手段来实现土地资源的有效管理[2,3]。在数字化浪潮的驱动下，随着海量存储、高速网络、物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的发展成熟，土地

资助项目：中国工程院重点咨询项目（2019-XZ-20）
修改稿收到日期：2020年5月9日

资源的治理势必进入一个全新发展阶段。在智慧社会发展战略引领下，充分利用我国国土信息化建设30多年的建设成果，构建以土地资源数字化、精细化、智能化为基础的“智慧土地”，为我国土地资源管控迈入全新的智慧化时代提供了机遇。

1 “智慧土地”内涵与发展机遇

当前，我们正在进入信息化新阶段，即以数据的深度挖掘和融合应用为主要特征的智能化阶段，在人-机-物三元融合的大背景下，以“万物均需互联、一切皆可编程”为目标，数字化、网络化和智能化呈现融合发展新态势[4]。技术进步催生了人类治理模式和治理体系的变革，“智慧土地”在“智慧地球”“智慧城市”和“智慧社会”建设的指引下应运而生，并被赋予新的时代内涵。

1.1 从“智慧地球”到“智慧土地”

2008年11月，IBM公司提出“智慧地球”概念；2009年1月，时任美国总统奥巴马公开肯定了IBM公司“智慧地球”思路，并将其上升为国家战略。2009年8月，IBM公司又发布了《智慧地球赢在中国》计划书，正式揭开IBM“智慧地球”中国战略的序幕。2009年8月，IBM公司发布了《智慧城市在中国》报告，自此后“智慧城市”建设进入广泛推广普及阶段。IBM公司认为“智慧城市”是运用信息和通信技术手段感测、分析、整合城市运行核心系统的各项关键信息，从而对包括民生、环保、公共安全、城市服务、工商业活动在内的各种需求做出智能响应。

党的十九大报告提出建设“智慧社会”，要充分运用物联网、互联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术，以网络化、平台化、远程化等信息化方式提高全社会基本公共服务的覆盖面和均等化水平，构建立体化、全方位、广覆盖的社会信息服务体系，推动经济社会高质量发展，建设美好社会。

“智慧地球”和“智慧社会”都是人类信息化由数字化、网络化向智能化的发展，从而推动人类社会治理模式和治理能力提升的过程。数字化奠定基础，实现数据资源的获取和积累；网络化构造平台，促进数据资源的流通和汇聚；智能化展现能力，通过多源数据的融合分析呈现信息应用的类人智能，帮助人类更好认知复杂事物和解决问题[4]。

相应地，我国土地信息化过程也经历了数字化、网络化建设发展阶段。1999年“数字国土工程”启动，从数字地球的战略高度，系统整合地球表层国土资源的空间基础信息，建立国土资源数据库。经过10年的建设，该工程于2009年基本完成国土资源调查等各类资源的数字化建库。2005年，以此为基础的“金土工程”启动，以“一中心三平台”（以国土资源“一张图”为基础的数据中心，以及电子政务平台、综合监管平台、共享服务平台）建设为核心内容，实现土地、矿产等调查、评价、规划与业务管理数据资源整合与信息化服务。

作为自然资源信息化顶层设计，2019年新组建的自然资源部在其发布的《自然资源部信息化建设总体方案》中明确提出：充分运用移动互联网、云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术，建成以自然资源“一张网”“一张图”“一个平台”为支撑，面向监管决策、政务服务和调查评价的自然资源信息化体系，全面增强自然资源动态监测与态势感知能力、综合监管与科学决策能力、政务“一网通办”与开放共享能力，提升自然资源管理的一体化、精细化和智能化水平。与此同时，部分城市和部分业务已开展智慧土地相关建设。例如：北京市开展了从“数字国土”到“智慧国土”的实践探索[5]；新一轮国土空间规划提出创建“智慧国土”空间规划体系，推动着“数字土地”向“智慧土地”时代的发展。

1.2 “智慧土地”的内涵

“智慧土地”是利用新一代信息技术来感知、监测、整合、分析土地资源状态、演变过程和人类对土

地资源开发、利用和保护过程中形成的各种人地关系，并据此对土地系统运行状态和过程作出迅速、灵活、准确的预警、调控和决策反应，融合"人本"与"技术"智慧以实现土地资源治理能力提升，构建高效、协调、可持续的土地资源系统。

建设"智慧土地"是在土地资源管理的数字化、网络化发展的基础上，通过智能化推动土地资源治理模式转变和治理能力提升的必然要求。其内涵包括 4 个维度特征：① 要让土地系统成为真正的生命体，有智慧、会思考；② 新技术能将土地系统的多维特征、变化与运行过程系统、精确、实时数字化到虚拟的数字空间，实现现实土地空间到虚拟数字空间的保真映射；③ 在虚拟空间能重建这些生命体，理解其运行机制、模拟其自组织行为；④ 具备对各种人类活动、自然环境变化带来干扰的响应、预警和调控决策能力。

2 "智慧土地"面临的挑战

在后工业文明和新一代信息技术快速发展的时代背景下，"智慧土地"面临着重大的历史机遇；同时，也面临着从传统的土地资源单要素利用导向的管理，向土地系统生命体的全要素、全方位、多功能认知和治理转变的挑战。

2.1 土地资源系统的再认知与新学科范式构建

在后工业文明时代，我国正在践行生态文明建设，土地资源内涵属性被赋予新内容，需要重新认识土地系统，以适应"智慧土地"发展的需求。认知土地系统需把握以下 4 点：① 土地资源的系统认知观。它是人地复合形成的生命体，是在土地资源长期演化形成自然属性的基础上，由人类在开发利用与保护过程中形成的人地关系复合系统。② 土地资源的多功能认知观。过去对土地资源的认知过于强调人类对土地的直接利用，农用地、建设用地、未利用地的三大类划分方式过于聚焦土地的农业用途与建设用途，容易导致对土地资源生态内涵的忽视[6]。在新的历史时期，土地资源的多功能属性被逐渐认知和重视，在传统的生产功能、承载功能的基础上，生态价值成为了土地资源系统的重要功能属性。③ 土地资源的广义价值观。土地由以经济为核心的生产要素演变为人口-经济-社会-生态-文化等多要素耦合，具备资源、资产、资本、生态、文化等多重属性，因此需建立广义的土地综合价值观[2,3]。④ 土地资源系统的格局与过程耦合认知观。耦合格局与过程是系统认知土地资源的基础要点[7]。土地资源的空间格局影响生态和人类利用过程，生态和人类利用过程也改变该空间格局，从而产生土地系统中的各种时空效应。

长期以来，土地科学所涉及的科学问题研究和人才培养零散分布在相关学科门类下，缺乏系统性和整装性[2,3,6,8,9]。要实现土地科技创新支撑，必须遵循土地科学的客观规律。在重新认知土地系统生命体的基础上，从理论逻辑出发，将现有土地资源、土地管理、土地经济、土地工程、土地信息技术、土地生态等领域的理论与方法进行有机整合，形成土地学科独有的理论体系与知识框架，凝练公认性、系统性和科学性的学科范式[10]，使得土地科学学科与人才培养体系能真正支撑智慧土地建设与发展。

2.2 土地系统的自组织与人类治理的共适

让土地系统真正成为有智慧、会思考的生命体，必须充分认知和发挥土地系统的自组织能力。人类文明发展史伴随着人类对土地资源系统认知和人地关系不断演进的过程。从史前文明人类对土地资源的不自觉利用，到农业文明人类对土地资源有意识的开发利用，再到工业文明人类对土地资源的高强度的剥夺式开发和利用，发展到后工业文明时代的可持续发展和生态文明成为人类共同的发展价值取向，人地关系发生了根本性变化。

如果说过去人类是以主宰者的身份在利用和改造着土地系统，是通过各种外部的干预手段来改变土地系统以满足人类发展需求目的；那么，在生态文明时

代，以“智慧土地”为导向的人类与土地系统的关系将是共生共适的关系，是从人地复合形成的生命体中去谋求人类福祉与土地资源系统可持续发展。构建共生共适框架下的“智慧土地”，传统的土地资源管理需要从人类对土地资源系统施加外部被动式干预的过程，向以充分发挥土地资源系统自组织功能的自发主动调试过程转变。

2.3 土地资源管理的行政层级体系与国土空间网络化格局协同

随着我国市场化和经济一体化深入发展，互联网、高速交通等新技术快速发展带来的“时空压缩”，传统城镇空间体系的等级色彩和行政边界的分隔效应正不断淡化，跨界联系日益加强，区域间、城镇间关系日趋扁平化、网络化，并直接影响跨界区域空间体系。

在新的网络化、区域协同发展背景下，城镇开发建设、生态用地保护正在实现网络化转型，以行政边界为单元的优势区位竞争原则的土地资源配置模式面临着新挑战。适合网络化空间组织的土地资源配置的基础理论和技术方法亟待发展，例如：土地资源开发利用与保护的空间冲突与协调发展机制解析的基础理论；城乡网络、生态保护网络、生产要素与人口流动网络等多网空间融合与镶嵌结构分析关键技术；综合层级体系垂向传导与网络结构横向交互的多尺度土地资源配置模型方法，构建土地资源网络化协同配置体系，为智慧土地建设提供基础框架。

2.4 “智慧土地”建设模式与支撑保障体系

国家在做好“智慧土地”建设顶层设计的基础上，如何结合各地方土地资源管理的实际及业务发展的需要，统筹推进“智慧土地”建设的试点、示范，探索“智慧土地”建设模式，是全面实施“智慧土地”建设的基础和关键。

根据目前各地方国土资源信息化建设的优势，遵循政府主导、公众参与的原则，可以采取2种途径分步实施“智慧土地”建设工程：① 以土地管理的重点业务智慧化建设为突破口，开展诸如“智慧土地”调查（基于“三调”建成的土地调查云为基础平台）、“智慧监管”（如“慧眼守土”工程）、“智慧土地”评价（基于已开展的“智慧国土”资源评价体系）、“智慧国土”空间规划（各地正在全面探索构建“智慧国土”空间规划体系和实施路径）。② 以土地管理全流程智能化框架体系和基础平台建设为主导的实践探索，如：自然资源部组织搭建的自然资源信息化顶层设计、全国自然资源原国土资源部信息中心组织建设的全国国土资源综合监管平台，以及北京等自然资源部门组织的城市级智慧土地建设探索。同时，“智慧土地”是对土地资源管理模式的全面变革，需要探索围绕土地资源管理业务的模式重构、标准化、信息安全、共享等相关政策、法规和体制机制建设和改革。

3 “智慧土地”建设需解决的关键技术

要实现土地系统有智慧、会思考，从技术角度需解决3个维度的关键问题：① 土地资源系统的全方位、系统的感知；② 土地资源系统感知数据的融合；③ 虚拟空间数字化重建土地资源系统并进行智能化分析决策。主要关键技术包括以下5个方面。

3.1 土地资源系统智能感知技术

我国已开展的3次全国性土地调查，特别是2017年以来开展的第三次全国土地调查，积累了大量的调查数据和技术手段，形成了全国土地资源调查、地理国情监测、年度变更调查、土地督察/执法等业务体系，为我国土地资源摸清家底、合理规划利用，以及有效监管起到了极大的作用。

但面向“智慧土地”建设需求，现有的调查监测技术难以满足，需要实现2个转变：① 从内容维度上，要实现从土地资源自然属性维度为主的调查监测向自然、社会经济综合维度的感知转变，即从对土

地资源的监测向人-地系统感知转变；② 从时空粒度上，空间上要实现从权属区图斑为基本单元向利用地块为单元的转变，时间上要由年度/季度的调查监测向实时化监控转变。为此，在技术上，需要综合运用 5G 技术、人工智能技术，以及对地观测网、物联网、社交网络等观测手段，构建一体化、立体感知技术体系，解决对地观测端对端直接对接的虚拟地面站服务技术、全国地块身份编码、海量数据搜索引擎、PB级数据流水线处理、图斑变化智能提取、实时在线调查取证等系列关键技术，建立地块信息变化驱动的主动式即时调查感知模式。

3.2 土地资源系统大数据聚合技术

数据化是信息化的基础，聚合的土地系统数据是实现"智慧土地"的重要保障。如何聚合智能感知网络获取的多源、多模态、异质的人地系统大数据，实现数据的全局协同，并全方位映射土地系统整体特征，是"智慧土地"的建设前提。当前，亟待研究解决国土空间系统全方位、全要素感知大数据的产生机理、认知方式与表现形式及其形式化表达模型、多元特征归一化表达方法、聚合与协同增强，以及大规模土地大数据存储与分布式管理等关键技术（图 1）。

3.3 土地系统生命共同体人地协同建模技术

土地系统是一个人文与自然过程耦合的人地复合的生命共同体。现有的土地系统建模方法强调了土地系统的自然和经济属性，对诸如土地利用决策主体的空间行为特征、土地市场、政策、法规、聚居人群等人文社会因素的关注严重缺乏，难以真实反映土地资源开发、利用与保护行为干预下的土地系统时空演变的规律，需要研究土地资源系统的自然与人文过程多尺度、多主体、多目标协同建模的基础理论和技术。理解人地复合的生命共同体运行机制是通过技术赋能智慧土地的前提，需揭示人地协同驱动的机理（图 2）。

传统的以单一图斑或栅格为计算载体，仅对土地资源利用空间进行划分和抽象，既难以服务土地资源系统演变过程的表达、分析、计算和调控决策全过程，也难以实现兼具自然与人文过程信息聚合单元和分析计算单元的任务需求。如何从自然与人文地理过程协同视角出发，改变这种现状？图 3 提出一种以位置为载体，进行土地系统的自然/人文过程的协同表达与建模基元，并在此基础上设计新的计算框架。

3.4 土地利用智能空间优化技术

智能优化技术是"智慧土地"实现智能调控决策的核心，群智能优化技术为"智慧土地"提供了技术支撑。然而，群智能优化技术仅提供了优化技术框架，难以直接解决显式的空间优化问题，还需要解决空间优化问题到群智能计算的空间化映射、空间寻优的领域知识化等关键问题。图 4 提供了一种基于五元

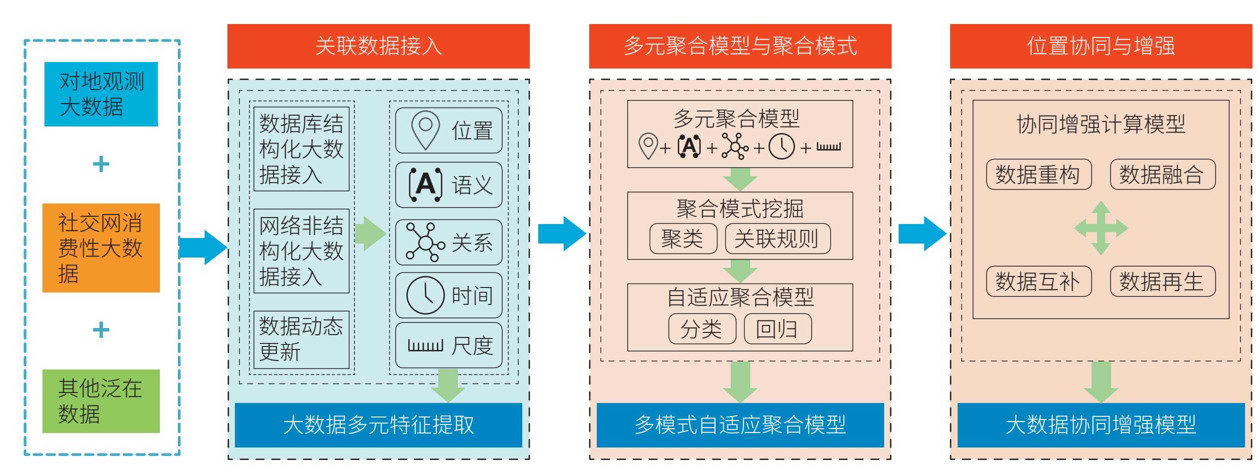


图 1　土地资源系统大数据聚合技术框架

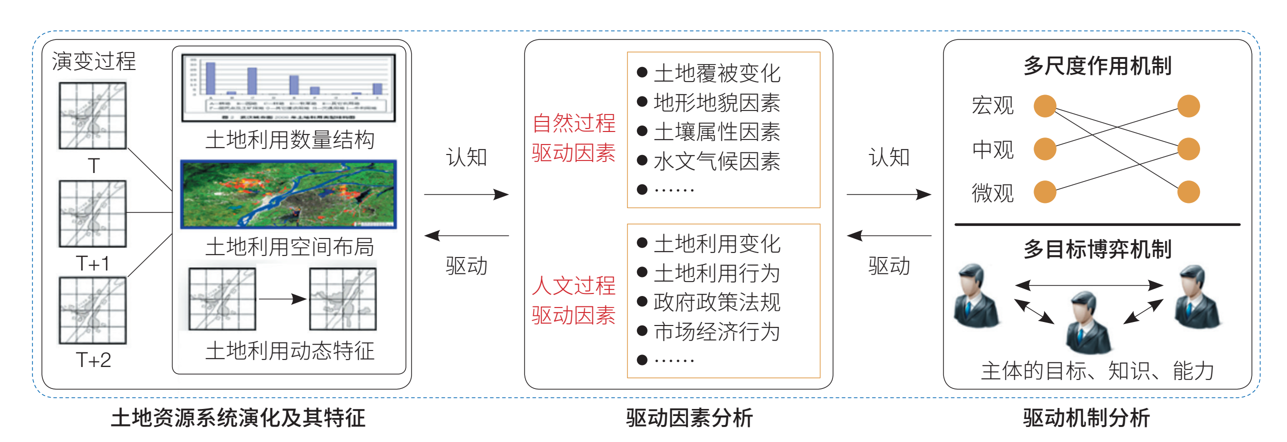


图 2　土地资源系统的人地协同驱动机制分析框架

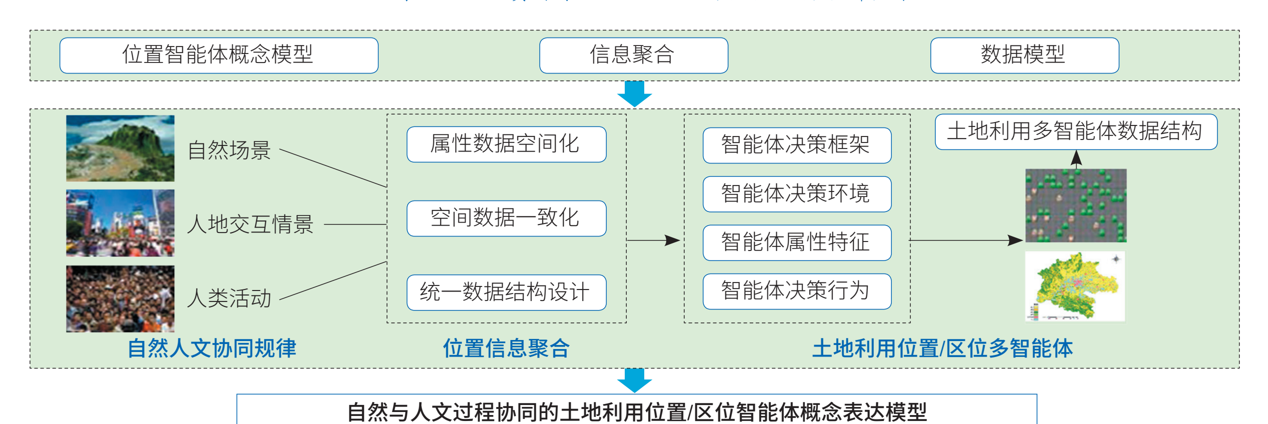


图 3　自然与人文过程协同的分析建模基元概念模型

组的空间优化问题形式化描述模型，并将其与群智能优化问题映射的概念框架。

土地利用空间优化是面向领域问题的复杂空间化决策问题，领域知识对空间优化问题的求解至关重要。群智能优化计算方法利用随机的交叉变异/信息素挥发/速度矢量等来实现解空间的逐步优化，是一种随机寻优算法。这种算法缺乏领域知识的约束和指导，容易陷入局部最优，导致优化结果与实际需求不符。图 5 提供了一种领域知识指导的智能空间优化建模框架，以解决空间优化建模由数据驱动建模向领域知识驱动建模方法的转变。

3.5 土地资源网络化协同治理技术

我国由工业文明向生态文明的范式转换过程中，面临着低环境负荷和高品质发展相平衡的挑战。随着“智慧社会”建设的加速，对于区域形态的影响加剧，交通等多领域的形态和模式都发生变化，未来区域空间形态主要表现为网络化和空间紧凑化。“智慧土地”时代的土地资源管理需借鉴多中心网络化治理理论和方法，推进传统的行政层级式和分区管理向多中心网络化协同治理模式转变。其核心是在多节点、扁平化、均衡性的空间结构模式基础上，通过网络化设施支撑发展区域间多向联系、城乡一体的联动关系，搭建人与自然共生多重交互、网络化协同治理框架，从而转变土地资源的治理模式，创建“智慧土地”时代的土地资源网络化协同治理体系，提升土地资源治理能力。

4 结语

数字化、网络化、智能化的新一轮科技革命与产业革命蓬勃发展，成为“智慧社会”发展的根本动

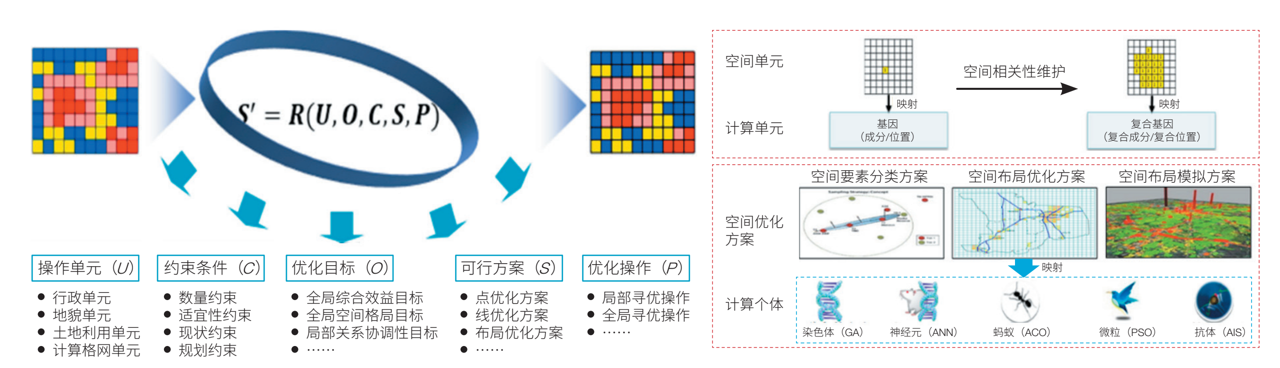


图 4　智能空间优化概念模型及其与群智能计算的空间显式映射

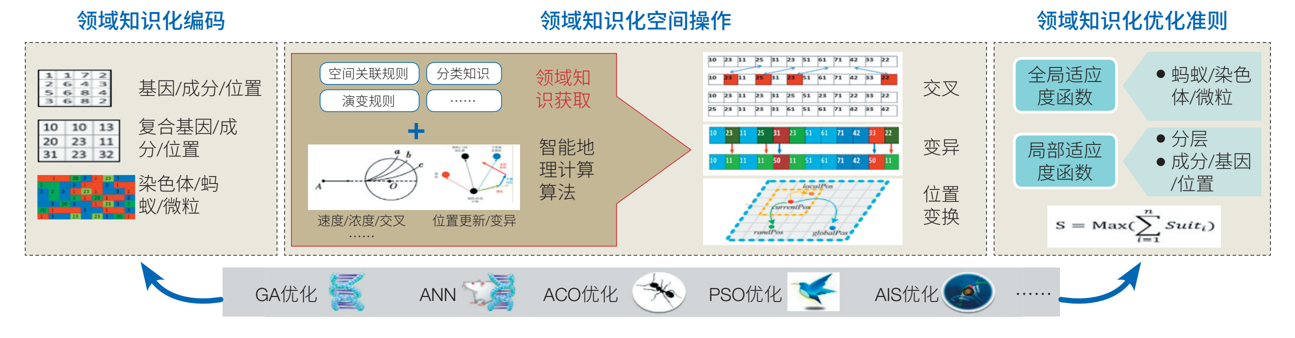


图 5　领域知识指导的群智能空间优化概念模型

GA，遗传算法；ANN，人工神经网络算法；ACO，蚁群算法；PSO，粒子群优化算法；AIS，自动识别系统

力。智能成为企业、行业、地区乃至国家核心竞争力的关键构成要素，这是“智慧社会”到来的重要特征。

当前，我国大力实施创新驱动发展战略，科技创新在对国土资源事业的支撑中发挥着引领作用。《国土资源部关于加快推进科技创新的若干意见》指出，到2050年，我国在“三深一土”（深地探测、深海探测、深空对地观测、土地工程技术）领域要进入世界领先行列，为建设世界科技强国作出贡献。

土地信息化走过了数字化、网络化发展阶段，正在步入“智慧土地”时代，“智慧土地”调查、评价以及“智慧国土”空间规划等部分土地资源管理业务已开始了相关建设实践探索。在此背景下，本文在梳理我国土地信息化建设历程和“智慧地球”“智慧城市”到“智慧社会”发展轨迹的基础上，总结了“智慧土地”的内涵，提出了“智慧土地”建设面临的挑战和需要解决的关键技术，为推进土地资源治理的智慧化建设提供参考和借鉴。

参考文献

1 肖金成. 优化国土空间开发格局的基本思路. 中国科学报, 2013-04-29(08).

2 郭仁忠. 土地工程科技：内涵、问题与创新. 中国发展, 2019, 19(4): 8-13.

3 郭仁忠，罗婷文. 土地资源智能管控. 科学通报，2019, 64(21): 2166-2171.

4 梅宏. 夯实智慧社会的基石. [2018-12-02]. http://opinion.people.com.cn/n1/2018/1202/c1003-30436468-2.html.

5 谢俊奇, 尹岷, 李建林. 大统筹、大数据、大融合，北京智慧国土的探索与实践. 国土资源信息化, 2016, (6): 6-10.

6 傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法. 科学通报, 2019, 64(21): 2172-2179.

7 傅伯杰. 土地资源系统认知与国土生态安全格局. 中国土地, 2019, (12): 9-11.

8 孙九林. 土地资源安全战略—认知、目标、研究方向与关键技术. 中国发展, 2019, 19(4): 71-75.
9 曹卫星. 以土地科技创新破 解资源要素禀赋难题. 中国发展, 2019, 19(4): 1-3.
10 朱道林, 李瑶瑶. 土地科学探索的历史脉络与理论逻辑. 中国发展, 2019, 19(4): 66-70.

Opportunities and Challenges for Sci-tech Innovation Promoted Development of Smart Land

LIU Yaolin HE Jianhua
（1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2 Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China;
3 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan 430079, China）

Abstract The pressure of China's land resource endowment and the sustained and rapid growth of population and economy has led to the unsustainable development problems such as high-intensity and high-risk utilization of land resources. It is urgent for land science and technology innovation to change the governance mode of land resources, improve the governance capacity, and develop the intelligent land with digital, refined and smart land resources as the core. This study discusses the basic concept and connotation of smart land, analyzes the problems and challenges in the construction of smart land, and puts forward the key technologies that need to be broken through, so as to provide reference for China to smoothly promote the construction of smart land.

Keywords smart land, living organism of land resources, intelligent sensing, big data aggregation, human & earth synergetics



刘耀林 武汉大学资源与环境科学学院教授。国际欧亚科学院院士。长期从事国土信息领域的教学科学研究工作。自然资源部优秀创新团队负责人，国务院学科评议组成员，数字制图与国土信息应用工程自然资源部重点实验室主任，地理信息系统教育部重点实验室主任和中国测绘学副理事长。曾任武汉大学资源与环境学院院长。获得多项国家、省部级科技进步奖，发表100多篇SCI论文，拥有20多项发明专利等。
E-mail: yaolin610@163.com

LIU Yaolin Received his doctor's degree from Wageningen University in the Netherlands. He is an academician of the Eurasian Academy of Sciences, Professor of the School of Resource and Environmental Sciences of Wuhan University. He is now the director of the excellent innovation team of the Ministry of Natural Resources, a member of the Discipline Evaluation Group of the State Council, Director of Key Laboratory of Digital Cartography and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Director of Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, and Vice President of Chinese Society of Geodesy Photogrammetry and Cartography. He once served as the dean of the School of Resource and Environmental Sciences. He has been engaged in teaching and scientific research in the field of land information for a long time, won several national and provincial science and technology progress awards, published more than 100 SCI indexed papers, hold more than 20 invention patents, etc. E-mail: yaolin610@163.com

■责任编辑：张帆